

THÈSES

PRÉSENTÉES

à la Faculté des Sciences
de l'Université de Paris

POUR OBTENIR LE TITRE D'
INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Roger LAMORAL

1^e THÈSE : Sur la mesure des coefficients d'absorption de matériaux
acoustiques par la méthode de la chambre réverbérante.

2^e THÈSE : Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 30 novembre 1954 devant la Commission d'examen :

MM. LUCAS	<i>Président.</i>
J. P. MATHIEU	{ <i>Examineurs.</i>
MAX MORAND	

ÉDITIONS DE LA
REVUE D'OPTIQUE THÉORIQUE ET INSTRUMENTALE

165, Rue de Sèvres — 3 et 5, Boulevard Pasteur

PARIS 15^e

1955

THÈSES

PRÉSENTÉES

à la Faculté des Sciences
de l'Université de Paris

POUR OBTENIR LE TITRE D'

INGÉNIEUR-DOCTEUR

PAR

Roger LAMORAL

1^e THÈSE : Sur la mesure des coefficients d'absorption de matériaux
acoustiques par la méthode de la chambre réverbérante.

2^e THÈSE : Propositions données par la Faculté.

Soutenues le 30 novembre 1954 devant la Commission d'examen :

MM. LUCAS	<i>Président.</i>
J. P. MATHIEU	} <i>Examineurs.</i>
MAX MORAND	

ÉDITIONS DE LA
REVUE D'OPTIQUE THÉORIQUE ET INSTRUMENTALE

165, Rue de Sèvres — 3 et 5, Boulevard Pasteur

PARIS 15^e

1955

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

Doyen. J. PÉRÈS.

PROFESSEURS

G. JULIA	T	Analyse supérieure et Algèbre supérieure.	SOLEILLET	T	Physique.
A. DENJOY	T	Théorie des Fonctions.	FORTIER	T	Mécanique expérimentale des fluides.
L. LUTAUD	T	Géographie Physique et Géologie dynamique.	DANJON	T	Astronomie.
E. DARMOIS	T	Enseignement de Physique.	FROMAGEOT	T	Chimie biologique.
R. LÉVY	T	Physiologie comparée.	LAPORTE	T	Physique générale et Radio-activité.
FOCH	T	Mécanique physique et expérimentale.	JANET	T	Mécanique analytique et Mécanique céleste.
PAUTHENIER	T	Électrotechnique générale.	PETIT	B	Biologie maritime.
DE BROGLIE	T	Théories physiques.	QUENEY	T	Météorologie et dynamique atmosphérique.
JOB	T	Chimie générale.	GALLIEN	T	Biologie animale (P. C. B.).
PRENANT	T	Anatomie et Histologie comparées.	EICHHORN	T	Biologie végétale (P. C. B.).
GARNIER	T	Géométrie supérieure.	DE CUGNAC	T	Biologie végétale (P. C. B.).
PÉRÈS	T	Mécaniques des fluides et applications.	Mlle CAUCHOIS	T	Chimie-Physique.
LAUGIER	T	Physiologie générale.	THELLIER	T	Physique du Globe.
M. CURIE	T	Physique (P. C. B.).	AUDUBERT	T	Électrochimie.
VALIRON	T	Calcul différentiel et intégral.	L'HÉRITIER	T	Génétique.
BARRABÉ	T	Géologie structurale et géologie appliquée.	GRIVET	T	Radio-Électricité.
G. DARMOIS	T	Calcul des probabilités et Physique mathématique.	PONCIN	T	Mécanique des fluides.
J. BOURCART	T	Géographie physique et Géologie dynamique.	THIRY	T	Mécanique appliquée.
Mme JOLIO-CURIE	T	Physique générale et Radio-activité.	DUBREIL	T	Arithmétique et théorie des nombres.
PLANTEFOL	T	Botanique.	QUELET	T	Chimie organique.
CABANNES	T	Recherches physiques.	CAGNIARD	T	Géophysique appliquée.
GRASSÉ	T	Évolution des êtres organisés.	CHAMPETIER	T	Chimie macromoléculaire.
PRÉVOST	T	Chimie organique.	CUVILLIER	T	Géologie structurale et géologie appliquée.
BOULIGAND	T	Application de l'analyse à la Géométrie.	JUNG	T	Pétrographie.
CHAUDRON	T	Chimie appliquée.	TRILLAT	T	Chimie-Physique.
WYART	T	Minéralogie.	WIEMANN	T	Chimie (M. P. C.).
TEISSIER	T	Zoologie.	JACQUINOT	T	Physique (P. C. B.).
MANGENOT	T	Biologie végétale.	VASSY	T	Physique de l'atmosphère.
P. AUGER	P	Physique quantique et relativité.	DESTOUCHES	T	Théories physiques.
MONNIER	T	Physiologie générale.	M. PRUVOST	T	Géologie.
PIVETEAU	T	Géologie.	AMIEL	T	Chimie (P. C. B.).
ROCARD	T	Physique (E. N. S.).	HOCART	T	Minéralogie.
H. CARTAN	T	Mathématique (E. N. S.).	J. R. MATHIEU	T	Physique (P. C. B.).
LAFFITE	T	Chimie générale.	COUTEAUX	T	Biologie animale (P. C. B.).
FAVARD	T	Mécanique générale.	MAY	T	Biologie animale (P. C. B.).
COULOMB	T	Physique du Globe.	CHOQUET	T	Calcul différentiel
Mlle COUSIN	T	Biologie animale (P. C. B.).	FELDMANN	T	Biologie (P. C. B.).
CHRÉTIEN	T	Chimie minérale.	GUINIER	T	Physique (P. C. B.).
P. DRACH	T	Zoologie.	JOST	T	Biologie (P. C. B.).
KASTLER	T	Physique.	FORTET	T	Calcul des Probabilités.
EPHROSSI	T	Génétique.	SCHWARTZ	T	Méthode mathématique de la Physique.
WURMSER	T	Biologie physico-chimique.	CHOUARD	T	Physiologie végétale.
RIVIÈRE	T	Géologie (P. C. B.).	MALAVARD	T	Aviation.
GAUTHERET	T	Biologie végétale (P. C. B.).	BRELOT	T	Calcul différentiel.
LUCAS	T	Physique.	NORMANT	T	Chimie (P. C. B.).
A. THOMAS	T	Biologie cellulaire.	BENARD	T	Chimie (P. C. B.).
ARNULF	T	Optique appliquée.	BUVAT	T	Botanique (E. N. S.).
Max MORAND	T	Physique.	DUGUE	T	Statistique mathématique.
			GELOSO	T	Chimie (P. C. B.).
			SOULAIRAC	T	Psychophysiologie.
			ULRICH	T	Physiologie végétale.
			MARÉCHAL	T	Optique théorique et appliquée

Secrétaire Général. . . Ch. MONIER.



SUR LA MESURE DES COEFFICIENTS D'ABSORPTION DE MATÉRIAUX ACOUSTIQUES PAR LA MÉTHODE DE LA CHAMBRE RÉVERBÉRANTE

par Roger LAMORAL
Ingénieur des Télécommunications *
Ingénieur-Docteur

SOMMAIRE. — *L'auteur indique (I) tout d'abord quelle était la position du problème au début de son étude, rappelle (II) la méthode de SABINE, donne (III) la comparaison entre les formules de SABINE, EYRING et MILLINGTON, précise (IV) la différence théorique entre les formules de MILLINGTON et EYRING, décrit (V) l'appareillage de mesures utilisé (chaîne d'émission, de réception, dispositif de coupure franche). Il expose (VI) les mesures effectuées (fidélité de la chaîne de mesures, influence de la surface traitée, du morcellement, de la position, du niveau sonore à la coupure). Il en déduit (VII) des premières conclusions, qui l'amènent à faire (VIII) de nouveaux essais. Les conclusions qu'il en tire (IX) lui font proposer (X) un abaque de mesures.*

I. POSITION DU PROBLÈME.

Depuis que W. C. SABINE a, pourrait-on dire, fondé l'acoustique moderne, de nombreuses discussions ont eu lieu, tant en France qu'à l'étranger, dans lesquelles les hypothèses faites par lui sont chaque fois controversées. En fait, après une longue période de stagnation, disons de 1900 à quelques années avant la deuxième guerre mondiale, pratiquement personne ne s'est penché sur le problème de l'acoustique architecturale, et il faut attendre les travaux de EYRING et de MILLINGTON pour rencontrer les premières atteintes aux théories de SABINE.

D'un côté purement pratique, il est certain que des divergences dans les résultats obtenus par les divers laboratoires sont monnaie courante en matière de coefficient d'absorption.

En France, le Conservatoire national des arts et métiers, le Centre national d'études des télécommunications et la Radiodiffusion-Télévision française font quotidiennement ces mesures et sont non moins quotidiennement en désaccord. Aux U. S. A. les laboratoires du National Bureau of Standards et de l'Acoustical Material Association de Riverbanks ont les mêmes difficultés.

Le but de cette étude est, d'une part de chercher à connaître les causes de ces divergences et surtout, d'autre part, de montrer l'influence de divers paramètres influant sur les résultats pratiques. Nous verrons, pour terminer, la possibilité d'utiliser avec un minimum d'erreur les chiffres obtenus en laboratoire, ceci dans n'importe quel type de mise en œuvre, par l'utilisation d'abaques. Pour ces expériences, il a été nécessaire de mettre sur pied une chaîne de mesure aussi perfectionnée que possible. Cela a évidemment posé de multiples problèmes d'ordre technique, surmontés successivement mais au prix de longues mises au point. Quelques dispositifs originaux ont été utilisés qui seront décrits par ailleurs.

II. MÉTHODE DE SABINE.

Rappelons tout d'abord sa conclusion tendant à caractériser la qualité acoustique des salles de concerts ou de conférences par ce qu'il a nommé le « temps de réverbération ».

Celui-ci a été défini comme le temps nécessaire pour que, après l'arrêt de la source sonore, la décroissance de l'énergie sonore en un point soit réalisée dans la proportion de 1 million à 1.

Par des considérations théoriques que nous critiquerons par la suite, SABINE a relié le temps de réverbération à l'absorption moyenne α d'une salle ; il a défini cette absorption comme la moyenne des absorptions α_i des panneaux dont est constituée la salle, c'est-à-dire par la formule :

$$\alpha = \Sigma \alpha_i S_i / S \quad \text{avec} \quad \Sigma S_i = S,$$

étant entendu que le coefficient d'absorption de chaque panneau est égal au rapport de l'énergie sonore absorbée à l'énergie incidente.

La formule de SABINE est, pour la salle réverbérante servant aux mesures :

$$T_0 = 0,16 V / \alpha_{\text{moy.}} S \quad (\text{s}),$$

V étant le volume de la salle en mètres cubes, S la surface totale des parois de la salle en mètres carrés.

Pour la salle revêtue d'une surface S_1 de matériau absorbant :

$$T_1 = 0,16 V / [(S - S_1) \alpha_{\text{moy.}} + \alpha S_1],$$

on en déduit le coefficient d'absorption de SABINE α du matériau mesuré :

$$\alpha = \frac{0,16 V}{S T_0} + \frac{0,16 V}{S_1} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_0} \right).$$

Dans les calculs consécutifs aux mesures effectuées nous avons utilisé exclusivement la formule de SABINE.

* A la Radiodiffusion-Télévision Française.

III. COMPARAISON ENTRE LES FORMULES DE SABINE, EYRING [1] ET MILLINGTON [2].

Soit une salle dans laquelle la densité d'énergie sonore initiale est E_0 , l'intensité sonore initiale I_0 sera :

$$I_0 = cE_0.$$

Appelons p' le libre parcours moyen d'un « rayon sonore » entre deux réflexions successives, et admettons que $p' = 4V/S$, V étant le volume de la salle et S la surface totale des parois. Si c est la vitesse du son, le temps moyen entre deux réflexions est $t' = p'/c$. Appelons α le coefficient moyen d'absorption de l'énergie sonore ; dans ce cas, le coefficient de réflexion sera $1 - \alpha$.

Nous pouvons, par conséquent, étudier la variation de l'intensité sonore I_t en fonction du temps :

au temps 0, l'intensité moyenne est I_0 ,

$$\begin{array}{llll} t' & \text{«} & \text{«} & \text{«} \quad I_0(1 - \alpha) \text{ après} \\ & & & \text{1 réflexion,} \\ nt' & \text{«} & \text{«} & \text{«} \quad I_0(1 - \alpha)^n \text{ après} \\ & & & \text{n réflexions ;} \end{array}$$

donc si nous posons $nt' = t$:

$$I_t = I_0(1 - \alpha)^{t/t'},$$

par conséquent :

$$I_0/I_t = (1 - \alpha)^{-t/t'} ;$$

prenons les logarithmes :

$$\begin{aligned} \text{Log } (I_0/I_t) &= \text{Log } (1 - \alpha)^{-t/t'} \\ &= 2,3 \log (I_0/I_t). \end{aligned}$$

SABINE avait défini $t = T$ le temps de réverbération lorsque $I_0/I_T = 10^6$, donc

$$T = 13,8 \, t' / -\text{Log } (1 - \alpha),$$

mais $t' = p'/c = 4V/S$, donc

$$T = \frac{13,8 \times 4}{c} \frac{V}{-S \text{Log } (1 - \alpha)}$$

et si V , S , c sont exprimés en m^3 , m^2 et m/s , la formule devient :

$$T = 0,161 V / -S \text{Log } (1 - \alpha),$$

connue sous le nom de la formule d'EYRING.

Nous pouvons remarquer la parenté de la formule de SABINE avec celle-ci :

développons le logarithme en série :

$$-\text{Log } (1 - \alpha) = \alpha + \alpha^2/2 + \alpha^3/3 + \dots$$

Si α est supposé petit on a donc :

$$-\text{Log } (1 - \alpha) \simeq \alpha$$

et on retrouve

$$T = 0,161 V / S\alpha, \quad \text{formule de Sabine.}$$

On peut donc noter le résultat suivant : pour passer de la formule d'EYRING à celle de SABINE, il

suffit de supposer petit le coefficient d'absorption ; ceci montre que la formule de SABINE a entre autres défauts celui de n'être valable que pour une salle assez réverbérante. Par ailleurs, nous faisons l'hypothèse que le son est diffus ; en effet, lorsque l'on cherche à démontrer que $p' = 4V/S$ on suit le raisonnement suivant (fig. 1) :

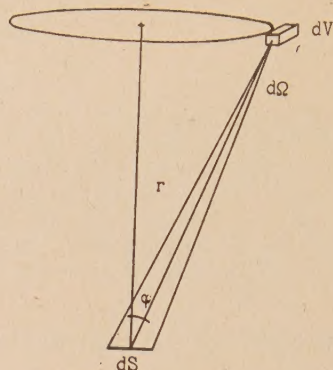


FIG. 1. — Libre parcours moyen.

Soit E la densité moyenne. De l'énergie $E dV$ du volume élémentaire dV , une fraction $d\Omega/4\pi$ va tomber sur l'élément de surface dS si nous appelons $d\Omega$ l'angle solide sous lequel on voit dS de dV .

$$\text{Or} \quad d\Omega = dS \cos \varphi / r^2 ;$$

mais tout ceci seulement si l'énergie sonore existant en dV est uniformément distribuée dans toutes les directions possibles de propagation : c'est ici que nous faisons l'hypothèse fondamentale de la parfaite diffusion du son. L'énergie contenue dans dV et tombant sur dS sera donc :

$$E dV dS \cos \varphi / 4r^2 \quad \text{mais} \quad dV = 2\pi r \sin \varphi r d\varphi dr,$$

si nous prenons l'anneau d'angle φ pour volume élémentaire.

L'énergie reçue par dS par seconde est :

$$\begin{aligned} \int_0^c \int_0^{\pi/2} \frac{E dS \cos \varphi}{4\pi r^2} 2\pi r^2 \sin \varphi d\varphi dr \\ = \frac{E dS}{2} \int_0^c dr \int_0^{\pi/2} \cos \varphi \sin \varphi d\varphi \\ = \frac{E dS}{2} \left[\frac{\sin^2 \varphi}{2} \right]_0^{\pi/2} = \frac{E c dS}{4} = \frac{I dS}{4} \end{aligned}$$

et l'énergie tombant sur les murs de la salle par seconde sera : $IS/4$.

Mais chaque « élément » de densité d'énergie rencontrera les parois en moyenne c/p' fois, donc l'énergie totale tombant sur les murs par seconde est :

$$c/p' VE,$$

VE étant l'énergie totale émise par le volume V ,

$$\text{donc} \quad c/p' VE = EcS/4$$

$$\text{d'où} \quad p' = 4V/S.$$

Si maintenant les parois reçoivent par seconde l'énergie $EcS/4$, on retire par seconde $EcS\alpha/4$, donc

$$EcS\alpha/4 = -dEV/dt,$$

ou $dE/E = -cS\alpha dt/4V$, en intégrant :

$$\text{Log } E = -CS\alpha t/4V + \text{Log } E_0,$$

ou $\text{Log } \frac{E_0}{E} = \frac{CS\alpha}{4V} t$, si $\frac{E_0}{E} = 10^6$:

$$2,3 \log \frac{E_0}{E} = \frac{CS\alpha T}{4} \quad \text{donne} \quad T = \frac{0,161 V}{S\alpha},$$

formule de SABINE trouvée directement sans faire l'approximation vue plus haut de $-\log(1-\alpha) \simeq \alpha$.

— Dans la pratique, il est donc dangereux de calculer le traitement acoustique d'une salle déjà assez sourde en utilisant la formule de SABINE puisque l' α moyen ne peut être considéré comme petit. Par ailleurs, plus on s'éloigne de la salle réverbérante, plus il est difficile de faire l'hypothèse d'une parfaite diffusion ; nous ne pouvons oublier qu'à la limite il n'y a plus que des ondes progressives.

De ces remarques il ressort que lors des mesures de coefficients d'absorption de matériaux acoustiques en salle réverbérante, l' α trouvé sera fonction de T_0 , donc corrélativement de la surface S_1 servant à la mesure — que l'on utilise la formule d'EYRING ou de SABINE.

Note sur la formule de MILLINGTON.

Le temps de réverbération donné par celui-ci est :

$$T = \frac{0,161 V}{-\sum S_i \text{Log}(1-\alpha_i)} = \frac{0,161 V}{\sum S_i \text{Log}[1/(1-\alpha_i)]}.$$

Cette formule est en fait identique à celle de SABINE. MILLINGTON, en effet, a été « choqué » par l'obtention fréquente, pour des matériaux très absorbants, de coefficients supérieurs à l'unité. Si on appelle β le coefficient de SABINE, qui n'est en fait que le logarithme de l'inverse du coefficient de réflexion, cela revient à écrire :

α_{Sabine} ou $\beta = \log \frac{1}{1-\alpha}$, α étant cette fois toujours inférieur à 1 (coefficient de MILLINGTON).

Cas concret faisant la critique des hypothèses.

Prenons un studio de $8 \times 6 \times 4$ mètres soit 192 m^3 avec un temps de réverbération de 0,6 seconde, donc normal.

Le libre parcours moyen p' sera :

$$p' = \frac{4V}{S} = \frac{4 \times 192}{208} = 3,70 \text{ m}$$

et le nombre de réflexions successives durant la décroissance de 10^6 :

$$n = \frac{0,6 \times 330}{3,7} = 53$$

ce qui semble malgré tout assez peu et montre combien facilement on s'écarte d'une parfaite diffusion du son. Cela laisse supposer que l'emplacement du matériau absorbant peut avoir une influence sur le temps de réverbération de la salle, selon les positions des sources et du microphone, donc sur les coefficients d'absorption mesurés.

De tout cela nous avons extrait deux idées directrices, mises en évidence dans la suite de l'exposé :

1) influence possible de la surface traitée S_1 sur le coefficient d'absorption mesuré [3, 4] ;

2) influence possible de l'emplacement du matériau [5, 6, 7, 8] ;

de plus nous ont été suggérées :

— l'influence possible du morcellement principalement par les phénomènes de diffraction aux limites des panneaux absorbants [5, 6, 7, 9] ;

— l'influence possible du niveau sonore par le fait que peut-être les matériaux ne se comportent pas de la même manière pour des pressions très différentes.

Les mesures systématiques faites par la suite corroboreront en grande partie ces suppositions.

IV. DIFFÉRENCE THÉORIQUE ENTRE LES FORMULES DE MILLINGTON ET EYRING.

Nous partons des deux formules suivantes :

(1) Millington : $T = \frac{0,161 V}{\sum S_i \text{Log}[1/(1-\alpha_i)]}$

(2) Eyring : $T = 0,161 V / -S \text{Log}(1-\bar{\alpha})$
[$\bar{\alpha}$ est défini par la relation $S\alpha = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots$]

Développons le dénominateur de (1) :

$$\begin{aligned} \sum S_i \text{Log}[1/(1-\alpha_i)] &= -\sum S_i \text{Log}(1-\alpha_i) \\ &= -S_1 \text{Log}(1-\alpha_1) - S_2 \text{Log}(1-\alpha_2) - \dots \\ &= -S_1(-\alpha_1 - \alpha_1^2/2 - \alpha_1^3/3 \dots) \\ &\quad - S_2(-\alpha_2 - \alpha_2^2/2 - \alpha_2^3/3 \dots) \\ &\quad \dots \dots \dots \\ &= S_1(\alpha_1 + \alpha_1^2/2 + \alpha_1^3/3 + \dots) \\ &\quad + S_2(\alpha_2 + \alpha_2^2/2 + \alpha_2^3/3 + \dots) \\ &\quad + \dots \dots \dots \\ &= S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \dots + S_1\alpha_1^2/2 \\ &\quad + S_2\alpha_2^2/2 + \dots + \text{cubes} + \dots \end{aligned}$$

Développons le dénominateur de (2) :
remarquons que

$$S\bar{\alpha} = S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots$$

donc :

$$\begin{aligned} -S \text{Log}(1-\bar{\alpha}) &= -S \text{Log}[1-(S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2)/S + \dots] \\ &= -S[-(S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots)/S \\ &\quad - (S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + \dots)^2/2S^2 - \dots] \\ &= S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \dots \\ &\quad + [(S_1\alpha_1)^2 + (S_2\alpha_2)^2 + S_3\alpha_3^3 + 2PQ]/2S \\ &\quad + \text{cubes}/3S^2 + \dots \\ &= S_1\alpha_1 + S_2\alpha_2 + S_3\alpha_3 + \dots + (S_1\alpha_1)^2/2S \\ &\quad + (S_2\alpha_2)^2/2S + \dots + \text{doubles produits du 2}^\circ \text{ degré} \\ &\quad + \text{cubes} + \dots \end{aligned}$$

Nous voyons que les termes du 1^{er} degré sont identiques, et que dès le 2^e degré on a la différence entre :

$$\begin{aligned} &\sum S_i \alpha_i^2/2 \quad (\text{Millington}), \\ (1/S) [\sum S_i^2 \alpha_i^2/2 + \sum S_i S_j \alpha_i \alpha_j] \quad (\text{Eyring}). \end{aligned}$$

Application à un cas concret.

Reprenons le studio de $8 \times 6 \times 4$ mètres soit $V = 192 \text{ m}^3$ avec $S = 208 \text{ m}^2$.

Supposons 40 m^2 de laine de verre de $\beta_1 = 0,9$,
 108 m^2 de plâtre de $\beta_2 = 0,02$,
 60 m^2 d'un aggloméré d'amiante de $\beta_3 = 0,6$,

et calculons le T par les deux formules (MILLINGTON et EYRING).

MILLINGTON :

$$T = \frac{0,161 V}{S_i \log [1/(1 - \alpha_i)]} = \frac{0,161 V}{\sum S_i \beta_i} \quad (\text{forme de Sabine}),$$

$$= \frac{0,161 V}{36 + 2,16 + 36} = 0,41 \text{ seconde.}$$

EYRING :

$$T = 0,161 V / - S \text{Log} (1 - \bar{\alpha}),$$

alors $\alpha_1 = 0,59$, $\alpha_2 = 0,45$, $\alpha_3 = 0,02$,
(car $\beta = \log [1/(1 - \alpha)]$)

$$\bar{\alpha} = \frac{0,59 \times 40 + 0,45 \times 60 + 0,02 \times 108}{208} = 0,253,$$

$$\bar{\beta} = \log [1/(1 - \bar{\alpha})] = 0,29,$$

donc $T = \frac{0,161 V}{S \log [1/(1 - \alpha)]} = \frac{0,161 V}{S \bar{\beta}} = \frac{30,72}{60,32},$
 $T = 0,51 \text{ seconde.}$

Les formules de MILLINGTON et d'EYRING donnent un T calculé probable variant de près de 25 %, selon que l'on utilise l'une ou l'autre, ceci pour un studio assez sourd, sans plus. Cet exemple simple matérialise les différences entre les deux formules exposées plus haut. On peut en conclure l'intérêt de la méthode d'EYRING dans la grande majorité des salles ou auditoria. Malheureusement, elle est d'un maniement moins aisé dans les projets.

V. APPAREILLAGE DE MESURES.

La salle réverbérante utilisée pour ces travaux est la plus grande des deux salles du Service d'acoustique architecturale de la R. T. F. Son volume est

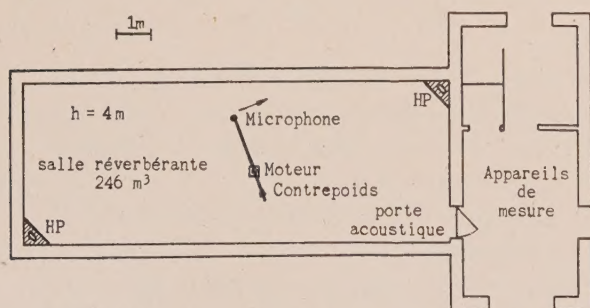


FIG. 2. — Plan de l'installation.

de 246 m^3 et la figure 2 en donne les dimensions exactes. Ce volume rentre donc dans les caractéristiques préconisées dans le projet de norme présenté au G. A. L. F. ($200 \pm 50 \text{ m}^3$).

Lors de mesures de temps de réverbération, trois

types classiques d'excitation peuvent être mis en œuvre :

— le claquoir, — le bruit blanc, — une fréquence hululée.

Nous avons opté pour le dernier système en raison de son aptitude à donner un encombrement plus faible dans le spectre sonore. En effet, les filtres d'octaves ou 1/3 d'octaves utilisés pour les deux premiers modes donnent une imprécision assez importante autour de la fréquence dite moyenne.

La modulation de fréquence a été choisie après des essais systématiques que nous exposons, de manière à avoir une décroissance du son dans la salle après extinction de la source, aussi régulière que possible.

Le problème de la coupure du son a retenu aussi notre attention en raison des phénomènes transitoires habituellement provoqués par une coupure brutale de l'excitation d'un haut-parleur. Un dispositif électro-optique a été expérimenté qui a donné toute satisfaction, il fera également l'objet d'une étude particulière.

L'appareillage de mesure comprend :

Chaîne d'émission.

Elle est essentiellement constituée d'un générateur basse fréquence modulé en fréquence, suivi du dispositif de coupure et d'un amplificateur de puissance alimentant les haut-parleurs. Ceux-ci sont du type exponentiel de haute qualité, donnant un faible taux d'harmoniques pour les niveaux utilisés. Ils sont au nombre de deux, placés dans deux angles opposés diagonalement dans la salle et équipés d'un baffle infini. De cette façon, on excite le mieux possible les divers modes (eigentones) de la salle.

Chaîne de réception.

Le microphone est du type électrodynamique, monté à l'extrémité d'un bras de longueur variable avec contrepois. L'ensemble est entraîné par un moteur silencieux à la vitesse de rotation de 0,5 t/s dans un plan horizontal.

Le but de ceci est de pouvoir limiter le nombre de positions du microphone à 1 au cours des essais

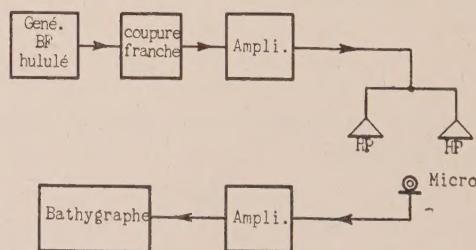


FIG. 3. — Schéma d'ensemble de l'appareillage de mesure.

puisque, de ce fait, on en a une infinité. Des essais comparatifs avec l'ancienne méthode consistant à faire plusieurs mesures avec positions différentes du microphone conduisent à une dispersion équivalente avec un gain de temps fort appréciable. De plus, la

courbe de décroissance du niveau sonore étant plus régulière, la lecture en est plus aisée et l'équation personnelle du lecteur diminuée d'autant. Le courant microphonique est alors amplifié et enregistré graphiquement sur un bathygraphe classique.

La figure 3 montre le schéma d'ensemble.

Recherche d'une utilisation optimum de l'hétérodyne hululée.

Au cours d'essais comparés du temps de réverbération mesuré dans la salle de 246 m³ par les méthodes : — du claquoir, — du souffle, — de l'hétérodyne hululée, on a constaté des différences de temps de réverbération lorsqu'on utilise l'hétérodyne hululée, avec un filtre à la réception ou non.

Nous étions à l'origine, partisans d'utiliser un filtre pour plusieurs raisons :

— la méthode du claquoir utilise un filtrage à la réception, pour pouvoir comparer les trois méthodes il semblait logique de travailler dans des conditions identiques ;

— lors du passage d'un régime permanent à un régime transitoire, ce qui est le cas de l'hétérodyne hululée à la coupure, on excite les fréquences propres de la salle éloignées de la bande théorique en raison même des phénomènes transitoires ;

— il s'agit d'une modulation de fréquence où le spectre varie énormément en largeur et amplitude avec l'excursion de fréquence et la fréquence de modulation.

Étudions donc la décomposition en série d'une oscillation entretenue modulée en fréquence :

La pulsation instantanée est :

$\Omega = \omega + \Delta\omega \cos pt$, ω : pulsation de la porteuse,
 $\Delta\omega$: excursion de fréquence, p : pulsation de modulation ;

la pression instantanée est donc :

$$d\pi = \Pi \sin(\omega + \Delta\omega \cos pt) dt$$

$$\pi = \Pi \sin\left(\omega t + \frac{\Delta\omega}{p} \sin pt\right),$$

$$= \Pi \left[\sin \omega t \cos\left(\frac{\Delta\omega}{p} \sin pt\right) + \cos \omega t \sin\left(\frac{\Delta\omega}{p} \sin pt\right) \right]$$

mais :

$$\cos(Z \sin \theta) = J_0(Z) + 2[J_2(Z) \cos 2\theta + J_4(Z) \cos 4\theta + \dots]$$

et

$$\sin(Z \sin \theta) = 2[J_1(Z) \sin \theta + J_3(Z) \sin 3\theta + \dots]$$

$J_0, J_1, J_2, \dots$ étant les fonction J de BESSEL.

Par conséquent la pression π peut s'écrire :

$$\pi = \Pi [J_0(\Delta\omega/p) \sin \omega t + 2(J_1(\Delta\omega/p) \sin pt \cos \omega t + J_2(\Delta\omega/p) \cos 2pt \sin \omega t + J_3(\Delta\omega/p) \sin 3pt \cos \omega t + J_4(\Delta\omega/p) \cos 4pt \sin \omega t + \dots)]$$

ou encore :

$$\pi = \Pi [J_0(\Delta\omega/p) \sin \omega t + J_1(\Delta\omega/p) [\sin(\omega + p)t - \sin(\omega - p)t] + J_2(\Delta\omega/p) [\sin(\omega + 2p)t - \sin(\omega - 2p)t] + J_3(\Delta\omega/p) [\sin(\omega + 3p)t - \sin(\omega - 3p)t] + \dots]$$

Il s'agit donc d'un spectre discontinu de fréquence dans le cas d'une modulation sinusoïdale. Les fréquences composantes correspondent aux pulsations : $\omega, \omega \pm p, \omega \pm 2p, \omega \pm 3p, \dots$ Les amplitudes sont données par les fonctions de BESSEL correspondantes, que nous avons pour coefficients, lesquelles peuvent être calculées aisément avec une table de fonction de BESSEL pour les valeurs choisies de $\Delta\omega/p$ (indice de modulation).

— Si on effectue ces calculs pour diverses valeurs de $\Delta\omega/p$ on trouve des spectres extrêmement variés dont quelques exemples sont donnés sur la figure 4.

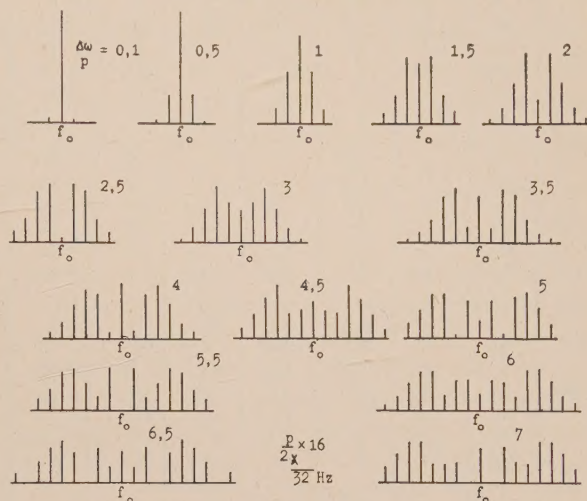


FIG. 4. — Spectres.

Par ailleurs, l'encombrement en fréquence est proportionnel à p pour un $\Delta\omega/p$ donné. Dans la recherche de $\Delta\omega/p, \Delta\omega$ et p convenant le mieux à la mesure du temps de réverbération, nous avons choisi deux valeurs de $\Delta\omega/p$ donnant des spectres aussi réguliers que possible, mais à nombre de raies différentes, à savoir :

$$\Delta\omega/p = 1,5, \quad \Delta\omega/p = 6.$$

Ces deux spectres ont l'avantage de donner des raies d'amplitude assez régulières pour deux encombrements du spectre différents.

Nous avons fait dix mesures pour chaque combinaison de l'excursion de fréquence et de la fréquence de modulation retenues après calculs préliminaires. Nous nous sommes placés aux fréquences standard : 125, 250, 500, 1 000, 2 000, 4 000 Hz.

Dans le tableau I sont inscrits les temps de réverbération moyens mesurés, l'erreur relative en %, l'allure de la décroissance définie, par les symboles TB, B, AB, M (très bon, bon, moyen, mauvais) et l'encombrement en hertz. De ces résultats sont déduits pour terminer les $\Delta\omega/p, \Delta\omega$ et p optima pour chaque fréquence porteuse standard.

Dispositif de coupures franches.

Comme nous l'avions écrit plus haut le problème se posait d'interrompre le son hululé de manière à éviter les phénomènes transitoires inhérents à la constitution des haut-parleurs.

TABLEAU I

Fréq.	EXCURSION DE FRÉQUENCE	FRÉQUENCE MODULAT.	$\Delta\omega/p$	T. MOYEN POUR 10 MESURES	ERREUR RELATIVE %	ALLURE DÉTOURNEANTE	ENCOMBR. FRÉQUENCE
125	6	4	1,5	11,8	27	M	± 8
	12	8	1,5	15,3	6,5	B	$\pm 16^*$
	24	16	1,5	13,8	15	B	± 32
	24	4	6			M	± 28
	48	8	6	12,9	9,3	B	± 56
250	6	4	1,5	9,3	7,5	B	± 8
	12	8	1,5	7,9	24	AB —	± 16
	24	16	1,5	9,5	6,3	B	± 32
	24	4	6	10,8	12	AB —	± 28
	48	8	6	9,5	5,2	TB	$\pm 56^*$
	96	16	6	9,3	5,4	TB	± 112
500	6	4	1,5			M	± 8
	12	8	1,5			M	± 16
	24	16	1,5	6,8	8,8	AB	± 32
	24	4	6			M	± 28
	48	8	6	7,2	4,2	B +	$\pm 56^*$
	96	16	6	7,5	5,3	TB	± 112
1 000	6	4	1,5	2,5	40	M	± 8
	12	8	1,5	3,7	8,1	AB	± 16
	24	16	1,5	2,2	13,7	M	± 32
	24	4	6	5,3	6	AB	± 28
	48	8	6	5	4	TB	$\pm 56^*$
	96	16	6	5	10	TB	± 112
	200	32	6	5	10	TB	± 224
2 000	6	4	1,5	3	23	M	± 8
	12	6	1,5	2,1	28	AB —	± 16
	24	16	1,5	4,2	29	AB —	± 32
	24	4	6			M	± 28
	48	8	6	4,8	16,5	B	± 56
	96	16	6	4,5	6,7	TB	$\pm 112^*$
	200	32	6	4,4	6,8	TB	± 224
	6	4	1,5	1,7	17,5	AB +	± 8
	12	6	1,5	2,3	28	AB —	± 16
	24	16	1,5	3	13	AB	± 32
	24	4	6			M	± 28
	48	8	6	2,25	6,7	TB	± 56
	96	16	6	2,3	5,3	TB	± 112
	200	32	6	2,45	2	TB	$\pm 224^*$

* Les valeurs retenues sont celles correspondant aux lignes marquées d'un astérisque.

Autrement dit, au lieu d'utiliser un contacteur



FIG. 5. — Exemples de coupures.

mécanique, nous cherchions un moyen d'éviter les flancs raides semblables à ceux de la figure 5 a pour se rapprocher du modèle de la figure 5 b.

Deux appareils électro-optiques successifs ont été essayés :

1) Le premier type (fig. 6) utilisait une tête de gravure munie d'une aiguille placée dans une fente

mince, le tout éclairé en courant continu 6 V. Le graveur était alimenté par le générateur BF et le flux lumineux alternatif ainsi obtenu était recueilli par une cellule photoélectrique après découpage en

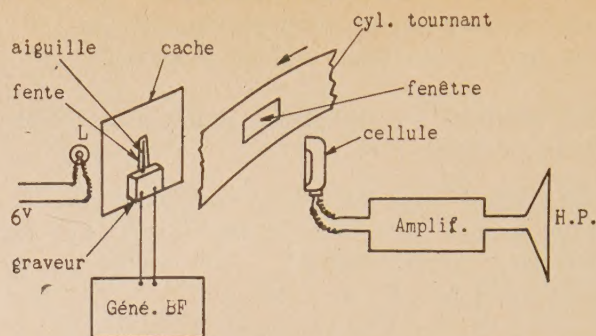


FIG. 6. — Premier dispositif de coupures franches.

impulsions par un cylindre tournant percé de fenêtres convenables.

L'avantage était d'avoir une faible distorsion, mais :

— on obtenait un niveau électrique très faible aux bornes de la cellule vu la faible énergie lumineuse frappant celle-ci ;

— une chute de 6 dB par octave due au graveur, car il ne nous avait pas été possible de nous procurer un graveur à élancement constant ;

— par ailleurs le réglage de la fente était fort délicat.

2) Le dispositif retenu est le suivant (fig. 7) : le flux lumineux alternatif est produit par un tube au néon alimenté par un générateur basse fréquence avec superposition de courant continu 70 volts. Cette source s'est avérée très supérieure à une lampe 3,5 V avec ou sans superposition de continu et à un tube néon sans source continu. Remarquons que ce dispositif peut donner des formes d'établissement et de

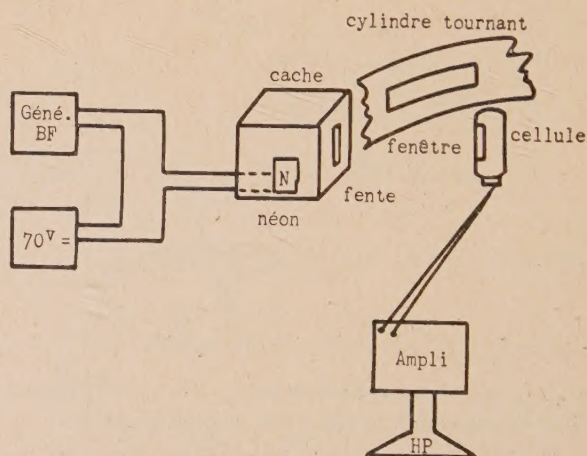


FIG. 7. — Deuxième dispositif de coupures franches.

coupe d'allure quelconque, il suffit pour cela de modifier la forme de la fenêtre pratiquée dans le tambour tournant.

Allure de l'établissement et de la coupe du son.

On a appliqué la tension de sortie de la cellule aux plaques de déflexion d'un oscillographe après ampli-

fication. La forme de l'impulsion envoyée a été filmée à l'aide d'une caméra à déroulement continu (plaques du tube cathodique survoltées pour augmenter la brillance).

La figure 8 donne l'allure de l'enregistrement photographique obtenu.

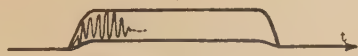


FIG. 8. — Forme réelle de la coupure obtenue.

Ceci semble satisfaisant et se rapproche de la figure 5 b évitant les régimes transitoires mécaniques dus au haut-parleur, inévitablement provoqués par une forme d'établissement quasi instantanée.

Considérons maintenant les phénomènes de coupure en tenant compte du haut-parleur.

Le montage utilisé est celui indiqué sur la figure 9.

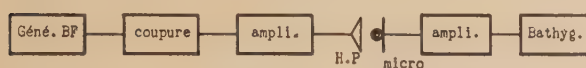


FIG. 9. — Schéma de l'appareillage.

Pour une fréquence de 1 000 hertz on a obtenu :

a) avec un contacteur mécanique une courbe représentée sur la figure 10 a ;

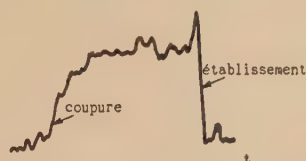


FIG. 10 a. — Coupure par contacts.

b) avec le dispositif électro-optique celle de la figure 10 b.

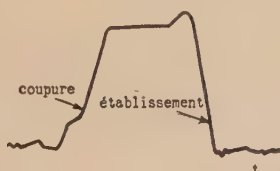


FIG. 10 b. — Coupure par dispositifs.

La comparaison entre les deux figures ci-dessus montre l'intérêt du dispositif.

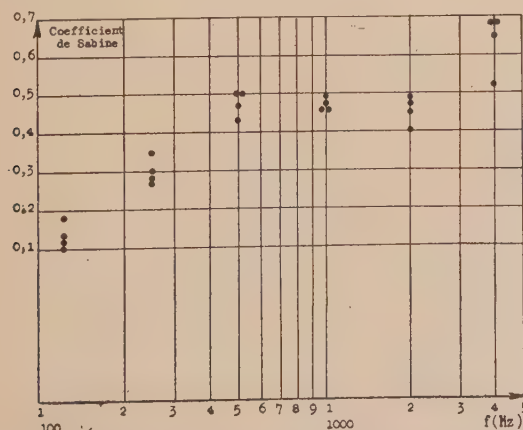


FIG. 11. — Fidélité de la chaîne α_{sab} pour les fréquences de 125, 250, 500, 1 000, 2 000, 4 000 Hz. Matériau : A.

VI. MESURES EFFECTUÉES.

Fidélité de la chaîne de mesures.

Avant d'étudier l'influence des divers paramètres sur le coefficient d'absorption mesuré en chambre réverbérante, nous donnons (tableaux II et III et figure 11) les résultats de mesures cherchant à chiffrer la fidélité de la chaîne.

TABLEAU II

TEMPS DE RÉVERBÉRATION MESURÉS
Sèvres. Salle de 246 m³.

SALLE VIDE					SALLE VIDE				
Fréq. moy.	T_1	T_2	T_3	T_m	Fréq. moy.	T_1	T_2	T_3	T_m
125	9,7	9,5	9	9,4	125	9,2	9	9,1	9,1
250	9,7	9,5	9,8	9,66	250	9,2	9,7	9,5	9,46
500	9,8	9,7	9,5	9,66	500	9,4	9,7	9,8	9,63
1 000	7,4	7,8	7,9	7,7	1 000	8,3	7,7	7,7	7,9
2 000	6	6,2	6,3	6,16	2 000	6,5	6,5	6,5	6,5
4 000	3	3,1	3,2	3,1	4 000	3,4	3,3	3,2	3,3

16 m ² matériau A* groupé sur sol					16 m ² matériau A groupé sur sol				
Fréq. moy.	T_1	T_2	T_3	T_m	Fréq. moy.	T_1	T_2	T_3	T_m
125	6,5	6,5	6,2	6,4	125	6,4	6,8	6,7	6,63
250	4,4	4,9	4,7	4,66	250	4,4	4,5	4,4	4,43
500	3,4	3,2	3,15	3,25	500	3,4	3,35	3,35	3,37
1 000	3,1	3	3,2	3,1	1 000	3,15	3,15	3,3	3,2
2 000	2,7	3	2,7	2,8	2 000	2,8	2,75	2,7	2,75
4 000	2	1,8	1,7	1,83	4 000	1,75	1,75	1,75	1,75

* Dans toutes les mesures « matériau A » signifie isorel mou 20 et matériau B : « Sonistop » Barbier.

TABLEAU III

COEFFICIENTS DE SABINE POUR LE MATÉRIAU A

$$\alpha = \frac{k_0}{T_0} + k \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right).$$

Volume de la salle : $V = 246$ m³, Surface totale de la salle $S = 261$ m², Surface du matériau : $S_1 = 16,5$ m².

$$k_0 = 0,161 V/S = 0,152 \quad k = 0,161 V/S_1 = 2,4.$$

Essai : Fidélité I.

F MOYENNE	125	250	500	1 000	2 000	4 000
T_0	9,3	9,4	9,6	8,3	6,3	3,2
T	5,4	4,1	3,5	3,3	3,15	1,73
$1/T$	0,185	0,245	0,276	0,303	0,317	0,579
$1/T_0$	0,108	0,106	0,104	0,120	0,159	0,313
$1/T - 1/T_0$	0,077	0,139	0,172	0,183	0,158	0,266
$k(1/T - 1/T_0)$	0,17	0,335	0,415	0,44	0,38	0,64
k_0/T_0	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04
α Sabine	0,18	0,35	0,43	0,46	0,40	0,68

État hygrométrique : 78 % ; Température : 6° C.

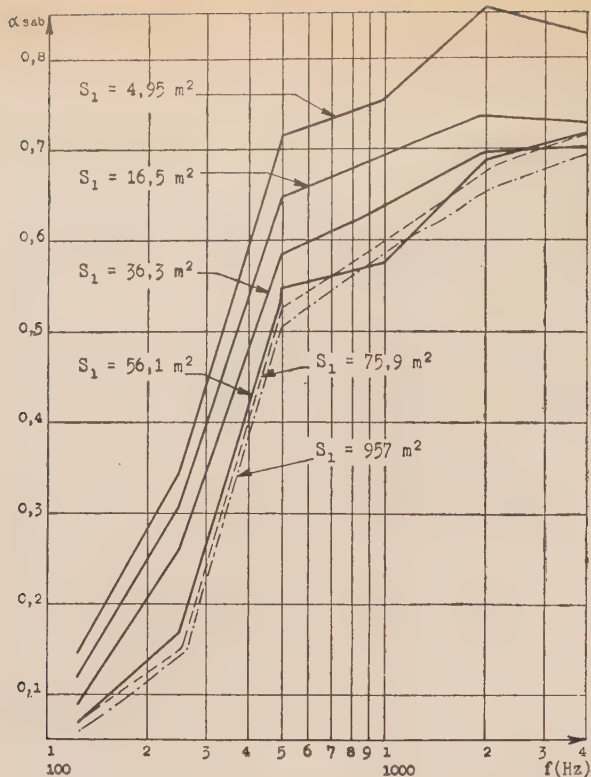


FIG. 12. — $\alpha = f(S_1)$. Matériau A. S_1 est dans chaque mesure placée sur le sol et groupée en un panneau.

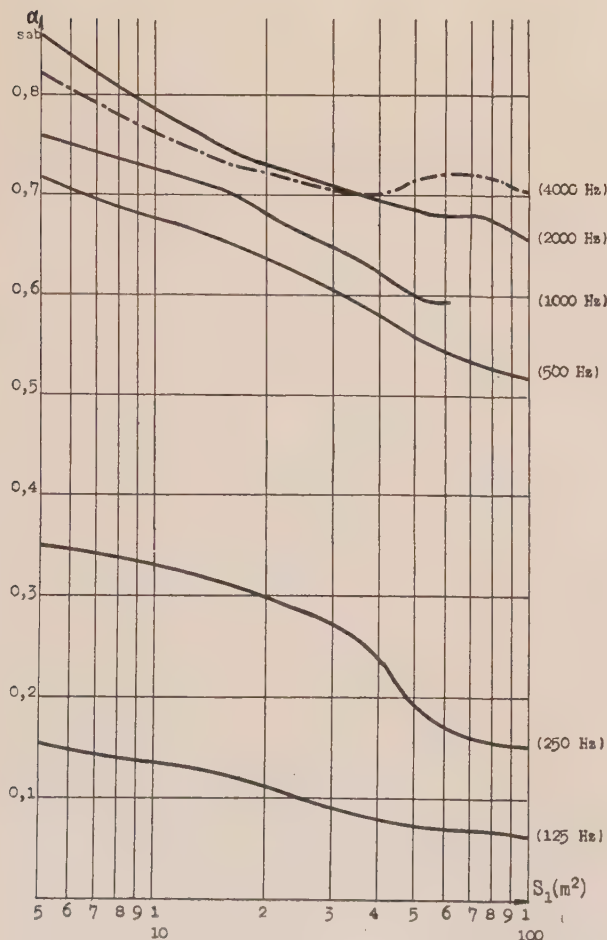


FIG. 13. — $\alpha_{sab} = f(S_1)$ pour les fréquences standards. Matériau A.

Influence de la surface traitée S_1 .

Pour deux types de matériaux, nous avons étudié l'influence de la surface traitée sur le coefficient

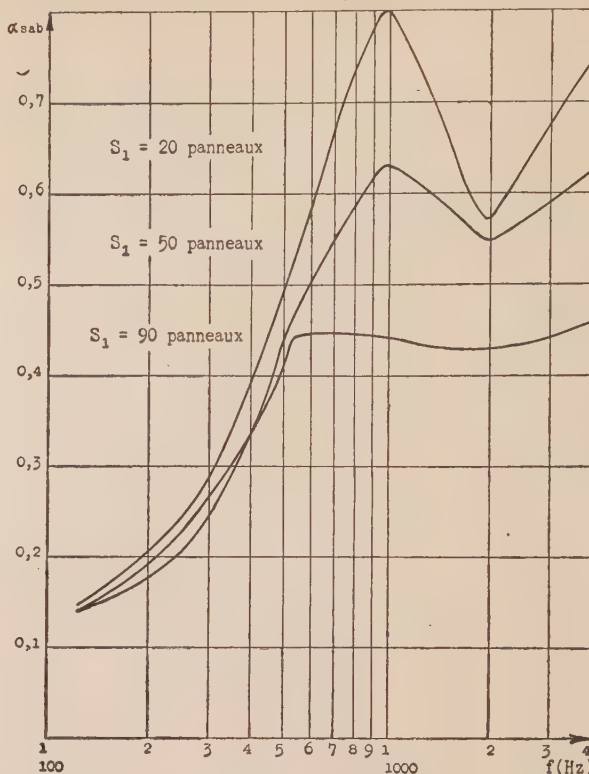


FIG. 14. — $\alpha = f(S_1)$. Matériau B (panneaux de 40×40 cm).

mesuré. Les résultats obtenus sont donnés sur les figures 11, 12, 13 et 14.

Influence du morcellement.

On voit sur les figures 15 et 16 l'influence du morcellement sur le coefficient de SABINE. On remarque l'importance des écarts selon la dimension unitaire des panneaux, la surface totale demeurant constante.

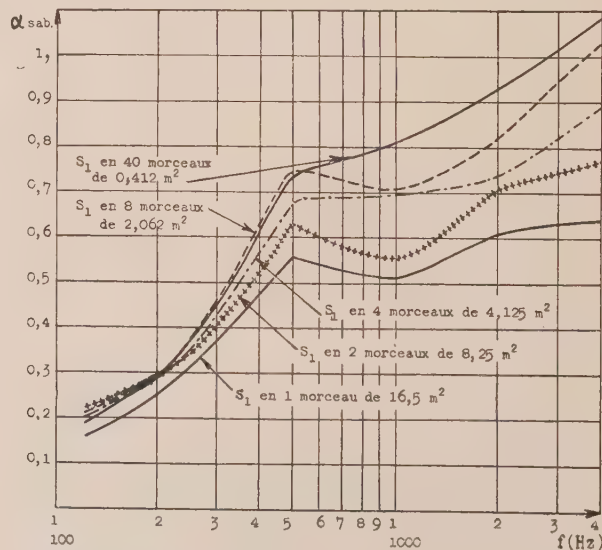


FIG. 15. — α_{sab} en fonction du morcellement, S_1 étant constant. Matériau A.

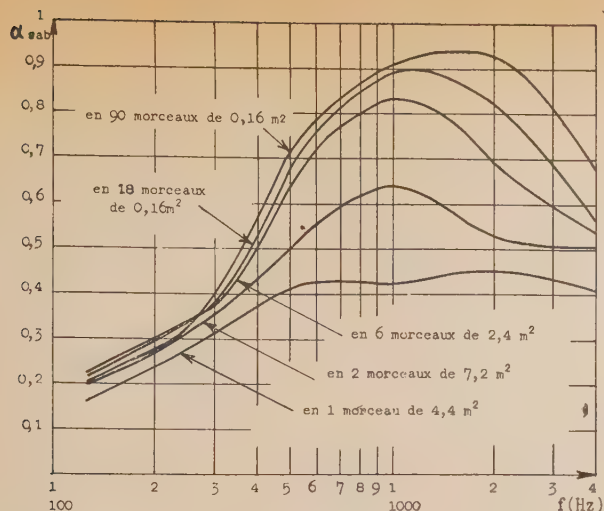


FIG. 16. — $\alpha_{\text{sab}} = f(\text{morcellement})$. S_1 étant constant. Matériau B.

Influence de la position.

Pour deux matériaux différents, on a mesuré le coefficient d'absorption à l'aide d'une surface constante, mais disposée différemment :

1. Répartie dans la salle en 5 éléments.

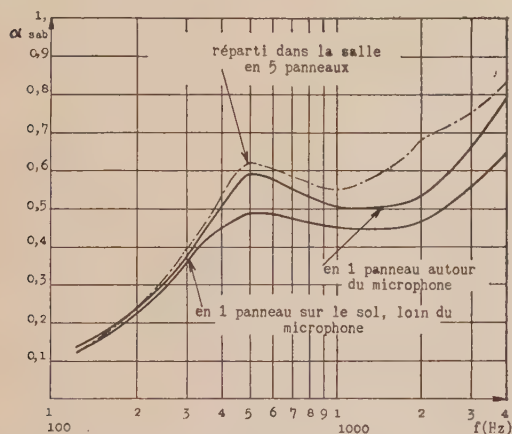


FIG. 17. — α_{sab} en fonction de la position du matériau (matériau A).

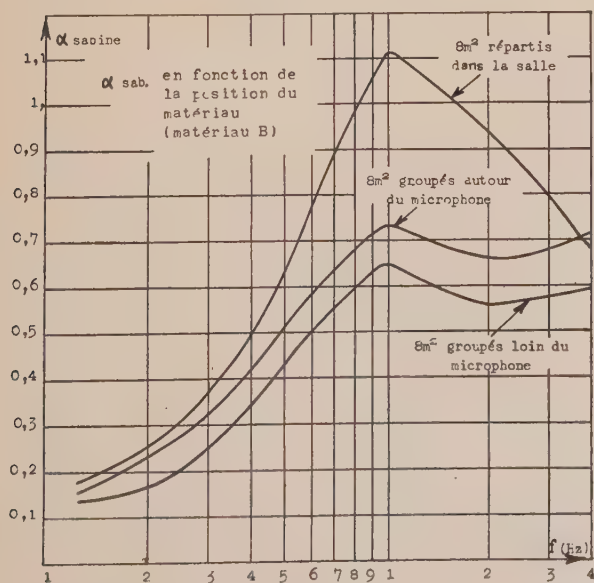


FIG. 18. — α_{sab} en fonction de la position du matériau (matériau B).

2. En 1 élément placé près du microphone tournant.

3. En 1 élément placé loin du microphone tournant.

Les figures 17 et 18 donnent les résultats obtenus.

Influence du niveau sonore à la coupure.

Les autres paramètres demeurant constants, nous avons fait varier le niveau sonore à la coupure. Les niveaux 85, 95 et 105 décibels ont été essayés. Nous donnons le tableau suivant à titre documentaire,

TABLEAU IV

COEFFICIENTS DE SABINE POUR LE MATÉRIAU A

$$\alpha = \frac{k_0}{T_0} + k \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right).$$

Volume de la salle : $V = 246 \text{ m}^3$; Surface totale de la salle : $S = 261 \text{ m}^2$; Surface du matériau : $S_1 = 16,5 \text{ m}^2$ en une fois sur le sol.

$$k_0 = 0,161 V/S = 0,152 \quad k = 0,161 V/S_1 = 2,4$$

Essai : Influence du niveau à la coupure. Niveau 85 dB.

F MOYENNE	125	250	500	1 000	2 000	4 000
T_0	10,5	11,2	13	7,2	6,4	3
T	6,4	4,4	3,7	3,3	2,8	1,72
$1/T$	0,157	0,227	0,270	0,303	0,358	0,581
$1/T_0$	0,095	0,089	0,083	0,139	0,157	0,333
$1/T - 1/T_0$	0,062	0,138	0,187	0,164	0,201	0,248
$k(1/T - 1/T_0)$	0,149	0,33	0,45	0,395	0,48	0,595
k_0/T_0	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,05
α Sabine	0,16	0,34	0,46	0,42	0,50	0,65

État hygrométrique : 78 %. Température : 6° C.

pour le niveau 85 décibels. Les autres niveaux ont donné des résultats voisins, les écarts observés rentrant dans les erreurs possibles de la chaîne.

VII. PREMIÈRES CONCLUSIONS.

Nous avons remarqué que dans les résultats obtenus jusqu'ici, les écarts entre les coefficients sont plus faibles aux fréquences basses.

La question se pose donc de savoir si ces faibles écarts (donc meilleure observation des hypothèses de bonne diffusion de SABINE) sont dus :

— au fait que l'on se trouve à des fréquences faibles ;

— au type des matériaux ayant servi aux essais, ces matériaux étant de la classe des matériaux poreux, donc ayant un coefficient d'absorption plus élevé aux fréquences hautes qu'aux fréquences basses.

a) La première raison (fréquences basses) peut s'expliquer par le fait qu'à ces fréquences, la longueur d'onde est grande, donc que la diffusion par les parois de la salle d'essai est meilleure. Si cette diffusion est bonne, on se rapproche des hypothèses de SABINE, et alors on doit s'attendre en effet à de

faibles écarts quelles que soient les conditions des mesures.

b) La seconde cause possible est la suivante : lorsque le coefficient d'absorption est faible (avec nos matériaux cas des fréquences basses) on a un plus grand nombre de réflexions successives sur les parois pendant la durée du temps de réverbération (double si le temps de réverbération a doublé). Par conséquent, ici aussi, on a une meilleure « diffusion » du son et on se rapproche des hypothèses de SABINE.

VIII. NOUVEAUX ESSAIS.

Nous avons donc par la suite recommencé des essais aux fréquences basses avec d'autres matériaux présentant eux des coefficients plus élevés à ces fréquences.

Remarquons toutefois que les figures 14 et 16 semblent montrer un resserrement des courbes aux fréquences très élevées alors que le coefficient d'absorption décroît à ces fréquences. (Il s'agit de Sonistop, constitué de laine de verre sous amiante perforée apportant un caractère sélectif à l'absorption avec un maximum vers 1 500 Hz.)

Cela nous incline à penser que le resserrement des courbes aux fréquences basses n'est pas dû au fait qu'il s'agit de fréquences basses mais plutôt de coefficients de SABINE faibles.

Cependant, à titre de vérification, nous avons effectué les essais suivants :

Essais de morcellement varié pour 10 m² de résonateurs réalisés à cet effet, et présentant un coefficient de SABINE assez élevé aux fréquences basses. Ces résonateurs ont une dimension unitaire de 5 × 6 × 10 centimètres avec un col de 32 mm et une profondeur de col de 5 mm. Ils sont réalisés en bois, isorel dur et isorel mou et présentés en panneaux de 1 m².

Les résultats du tableau V confirment ce que nous supposions plus haut, à savoir que le resserrement des courbes aux basses fréquences était dû auparavant à la faible absorption des matériaux essayés (A et B) pour ces fréquences.

TABLEAU V

INFLUENCE DU MORCELLEMENT

ESSAI DE RÉSONATEURS R. T. F. 500-04. SALLE DE SÈVRES 170 m³

FRÉQUENCE MOYENNE	VIDE			MOYENNE	10 m² RÉSONATEURS EN 1 FOIS 10 m²			MOYENNE
125	4,8	4,9	5	4,9	3,1	3,2	3,3	3,2
250	4,9	4,7	4,5	4,7	3	3	3	3
500	4,8	4,8	4,8	4,8	3,2	3,2	3,3	3,23
1 000	4,8	4,8	4,8	4,8	3,5	3,4	3,5	3,47
2 000	4,8	4,8	4,8	4,8	2,5	2,5	2,5	2,5
4 000	3	3	3	3	2,5	2,5	2,5	2,5

FRÉQUENCE MOYENNE	10 m² RÉSONATEURS EN 2 FOIS 5 m²			MOYENNE	10 m² RÉSONATEURS EN 4 FOIS 2 m²			MOYENNE
125	3,3	3,2	3,1	3,2	3	3	3	3
250	3	2,8	2,75	2,85	2,7	2,7	2,8	2,73
500	2,8	2,8	3	2,83	2,8	2,8	2,8	2,8
1 000	3,1	3,1	3	3,07	2,8	2,8	2,8	2,8
2 000	2,4	2,4	2,4	2,4	2,1	2,1	2,1	2,1
4 000	2,2	2,3	2,3	2,27	2,3	2,1	2,1	2,1

FRÉQUENCE MOYENNE	10 m² RÉSONATEURS EN 10 FOIS 1 m²			MOYENNE				MOYENNE
125	3	2,9	3	2,97				
250	2,8	2,7	2,7	2,73				
500	2,8	2,8	2,8	2,8				
1 000	2,8	2,8	2,8	2,8				
2 000	2	2	2	2				
4 000	2	2	2	2				

TABLEAU VI

COEFFICIENTS DE SABINE POUR RÉSONATEURS R. T. F.

$$\alpha = \frac{k_0}{T_0} + k \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right).$$

Volume de la salle : V = 170 m³ ; Surface totale de la salle S = 200 m² ; Surface du matériau : S₁ = 10 m².

$$k_0 = 0,161 \, V/S = 0,135 \quad k = 0,161 \, V/S_1 = 2,7.$$

Essai : Morcellement en une fois 10 m².

F MOYENNE	125	250	500	1 000	2 000	4 000
T₀	4,9	4,7	4,8	4,8	4,8	3
T	3,2	3	3,23	3,47	2,5	2,5
1/T	0,312	0,333	0,310	0,289	0,400	0,400
1/T₀	0,204	0,213	0,208	0,208	0,208	0,333
1/T - 1/T₀	0,108	0,120	0,102	0,081	0,191	0,067
k(1/T - 1/T₀)	0,29	0,33	0,28	0,22	0,52	0,18
k₀/T₀	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05
α Sabine	0,32	0,36	0,31	0,25	0,58	0,22

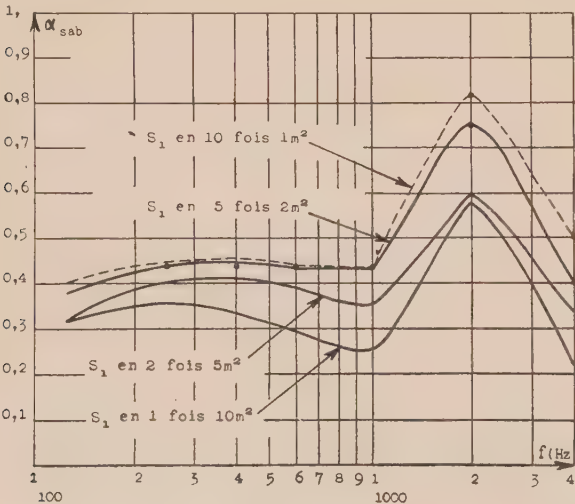


FIG. 19. — Influence du morcellement ; résonateurs RTF 500-04. S₁ = 10 m².

Ici on obtient des écarts plus importants, le coefficient de SABINE des résonateurs étant plus grand ; la figure 19 qui donne l'ensemble des résultats le montre bien. Le tableau VI est présenté à titre d'exemple de calcul.

IX. CONCLUSIONS.

De ces résultats on peut tirer les enseignements suivants :

I. Lorsque l'on pose un certain nombre de mètres carrés d'un matériau acoustique dans une salle, le

X. ABAQUE PROPOSÉ.

Alors, il sera possible d'utiliser les abaques qui suivent lors d'un projet de traitement de salle (fig. 20).

En effet, dans l'état actuel des choses, on peut arriver à des erreurs monumentales. Supposons que l'on mesure 5 m^2 d'un matériau A dans une salle de 250 m^3 et 260 m^2 de surface totale, ces 5 m^2 étant en 100 éléments disséminés sur les parois de la salle.

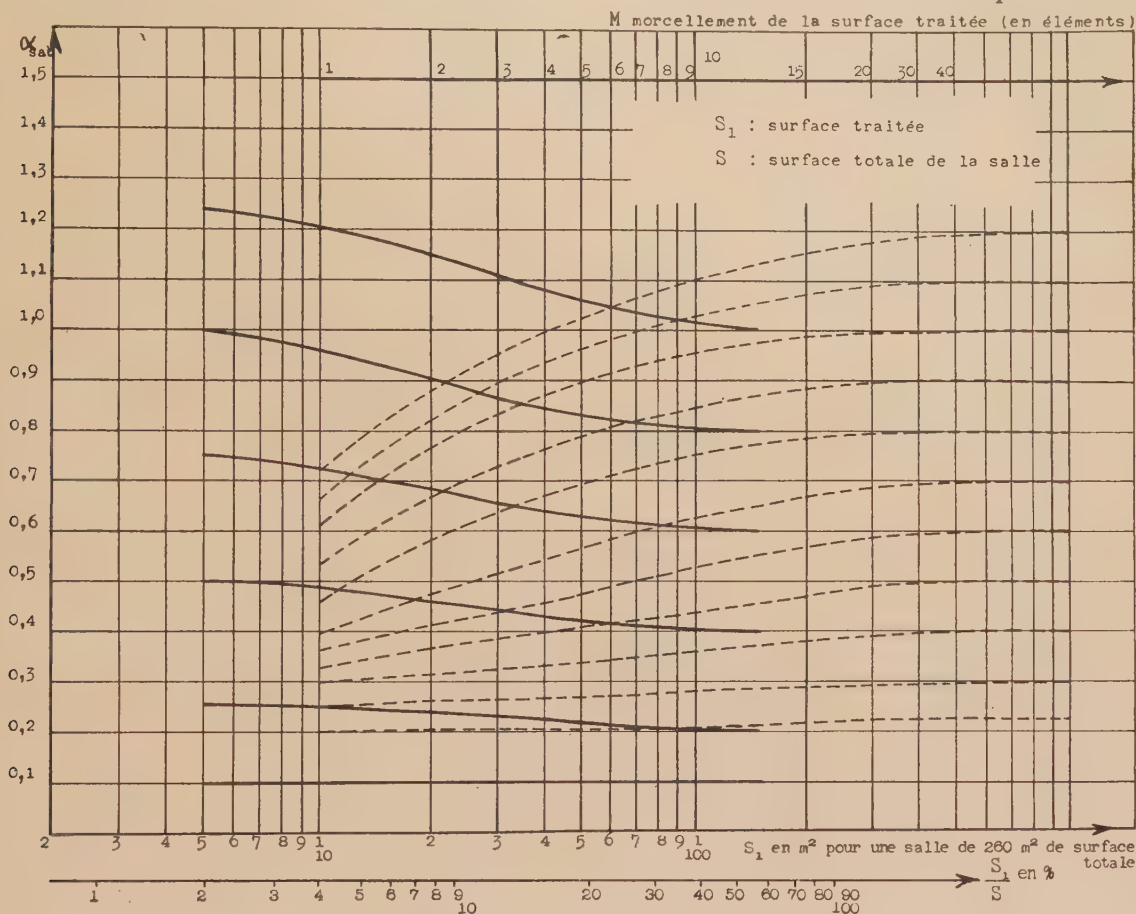


FIG. 20. — Abaques d'utilisation des résultats de cette étude.

coefficient de SABINE de celui-ci est d'autant plus grand que ce nombre de mètres carrés est plus petit.

II. Lorsque l'on pose une surface S_1 invariable de matériau acoustique dans une salle, le coefficient de SABINE de celui-ci est d'autant plus élevé que S_1 est morcelée en un plus grand nombre d'éléments.

III. Le temps de réverbération d'une salle varie avec la position du microphone servant à la mesure : Un matériau acoustique est plus efficace dans son voisinage qu'en un emplacement éloigné (ceci est déduit de l'étude sur l'influence de la position).

IV. Le niveau sonore à la coupure ne semble pas avoir d'influence sur les résultats de mesures.

De plus :

NÉCESSITÉ DE DÉFINIR AVEC PRÉCISION LES CONDITIONS DE MESURE DANS UNE NORMALISATION DE CETTE MÉTHODE.

Les mesures donnent, disons, un coefficient de SABINE de 0,8 à une certaine fréquence. Supposons maintenant qu'il s'agisse de traiter une salle de $V = 50 \text{ m}^3$ et $S = 50 \text{ m}^2$ que l'on veut rendre assez sourde. On sera donc amené à poser, disons 25 m^2 du matériau considéré, peut-être groupé pour des raisons de décoration ; le coefficient de SABINE, dans ces conditions ne sera peut être que de 0,4 d'après les résultats de cette étude : *Donc le temps de réverbération sera la moitié de celui prévu par le calcul.*

L'abaque de la page suivante permet de limiter de telles erreurs à quelques %, si l'on connaît les conditions de la mesure du coefficient de SABINE pour les matériaux usuels, en chambre réverbérante.

Par exemple : en salle de 200 m^3 , $S = 200 \text{ m}^2$, $S_1 = 10 \text{ m}^2$ groupé loin du micro.

Utilisation des abaques de la figure 20.

Abaques en traits pleins : influence de la surface traitée sur le coefficient de SABINE apparent.

Abaques en traits interrompus : influence du morcellement du traitement sur le coefficient de SABINE apparent.

a) Soit un matériau donné et supposons que son coefficient de SABINE ait été mesuré dans une salle réverbérante de 260 m^2 de surface totale, à l'aide d'une surface S_1 de 10 m^2 .

b) Supposons que nous voulions l'utiliser dans une salle de $1\,000 \text{ m}^3$ avec un morcellement en 10 panneaux et utiliser environ 200 m^2 de ce produit.

Le coefficient à une certaine fréquence est de 0,5 par exemple, d'après la mesure a.

1. Pour passer des 10 m^2 dans une salle de 260 m^3 aux 200 m^2 dans la salle de $1\,000 \text{ m}^3$ (c'est-à-dire pour passer de : $S_1/S = 4\%$ à $S_1/S = 20\%$) on considère le point de coordonnées $\alpha = 0,5$ et $S_1/S = 4\%$, il se trouve légèrement au-dessus d'une courbe en trait plein ; on glisse le long de celle-ci jusqu'à l'abscisse $S_1/S = 20\%$ et on lit $\alpha = 0,43$.

2. Pour passer de S_1 en 1 seul panneau (condition supposée de l'essai préliminaire) à S en 10 panneaux, on se sert des courbes en traits interrompus :

on part du point de coordonnées $\alpha = 0,43$ et $M = 1$;

on glisse le long de la courbe pointillée passant par ce point et on la suit jusqu'au point d'abscisse $M = 10$;

on trouve $\alpha = 0,72$ environ ; chiffre à utiliser pour le calcul du temps de réverbération de la salle de $1\,000 \text{ m}^3$ que l'on désire traiter.

On voit sur cet exemple l'intérêt de ces abaques lesquelles permettent d'éviter ici une erreur de 40% .

Manuscrit reçu le 5 juillet 1955.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] EYRING (C. F.). Reverberation time in "dead" rooms. (Temps de réverbération en chambres sourdes.) *J. acoust. Soc. Amer.* (janv. 1930), **1**, n° 2, pp. 217-241.
- [2] MILLINGTON (G.). A modified formula for reverberation. (Formule modifiée pour la réverbération.) *J. acoust. Soc. Amer.* (juill. 1932), **4**, n° 1, pp. 69-82.
- [3] MORRIS (R. M.), NIXON (G. M.), PARKINSON (J. S.). Variations in sound absorption coefficients as obtained by the reverberation chamber method. (Variation des coefficients d'absorption mesurée en chambre réverbérante.) *J. acoust. Soc. Amer.* (janv. 1938), **9**, n° 3, p. 234.
- [4] HARRIS (C. M.). The effect of position on the acoustical absorption by a patch of material in a room. (Influence de la position de l'échantillon sur le coefficient en salle réverbérante.) *J. acoust. Soc. Amer.* (janv. 1946), **17**, n° 3, p. 242.
- [5] FESHBACH (H.), HARRIS (C. M.). The effect of non-uniform wall distribution of absorbing material on the acoustics of rooms. (Effet de distribution non uniforme de matériau absorbant sur l'acoustique d'une salle.) *J. acoust. Soc. Amer.* (oct. 1946), **18**, n° 2, p. 272.
- [6] SABINE (P. E.). Measurement of sound absorption coefficient from the view point of the testing laboratory. (Mesure des coefficients d'absorption acoustique vue sous l'angle du laboratoire d'essais.) *J. acoust. Soc. Amer.* (juill. 1939), **11**, n° 1, 1^{re} partie, pp. 41-44.
- [7] SABINE (P. E.). Effects of Cylindrical Pillars in a reverberation chamber. (Effets de polycylindres en salle réverbérante.) *J. acoust. Soc. Amer.* (1938), **10**, n° 1, pp. 1-5.

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

L'analogie des maquettes dans l'étude des échos.

Vu et approuvé :

Paris, le 25 novembre 1954,

LE DOYEN DE LA FACULTÉ DES SCIENCES

Signé : J. PÉRÈS.

Vu et permis d'imprimer :

LE RECTEUR DE L'ACADÉMIE

DE PARIS :

Signé : J. SARRAILH.

